第1章

命を預かる介護ロボットには何が求められるのか

人と触れ合うための柔らかさを持つロボットの開発最前線

羅 志偉

ロボットが人間を傷つけることは，一度たりともあってはならない．しかし，予想できない人間の動きに対応するために，絶対に間違いのないソフトウェアやハードウェアを作ることは不可能であろう．であれば，人と接するロボットには，間違いがあっても人間を傷つけることのないような「柔らかさ」を持つことが求められる．（編集部）

近年，電気電子工学やシステム制御工学，情報通信技術の急速な発展に支えられて，人間に近い形状とサイズで人並みの体力を持ち，視覚，聴覚，触覚，きゅう覚など，多種多様な感覚情報を迅速に処理できる自律型のロボットが実現しつつあります．その一例として「RI-MAN」（**写真1**）が挙げられます．

RI-MANは，名古屋市にある理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センターのチーム間研究連携で開発されたロボットです．最大の特徴は，面状触覚を利用し，全身を使って人間と同サイズの人形を柔軟に抱き上げられることです．これにより，介護支援作業などの現場での応用が熱く期待されています．

これまでも2足歩行ロボットやペット・ロボットなど，さまざまなロボットが開発されてきましたが，基本的に見て楽しむもので，全身の力を駆使して人間と物理的に触れ合いながら柔軟に力仕事を行うことは大変困難でした．RI-MANは，以下のような最新の要素技術を数多く統合させることによって開発されたものです．

1）モータを干渉駆動することによる小型で大きな操作力の実現（第2章で説明）
2）触覚をフィードバックすることで得られる柔軟な動作（第3章で説明）
3）各関節に取り付けられたセンサなどの情報の共有と処理が両立できるネットワーク（第2章で説明）
4）3次元動力学シミュレーションによる設計や動作の生成，評価

また，実験室レベルでは，人による音声指示で作業の確認と実行が可能です．その作業例として，被介護者としての人形をベッドから抱き上げることに成功しています．

2015年には人口の実に4分の1が65歳以上の高齢者となるこれからの日本においては，RI-MANのような「人と柔

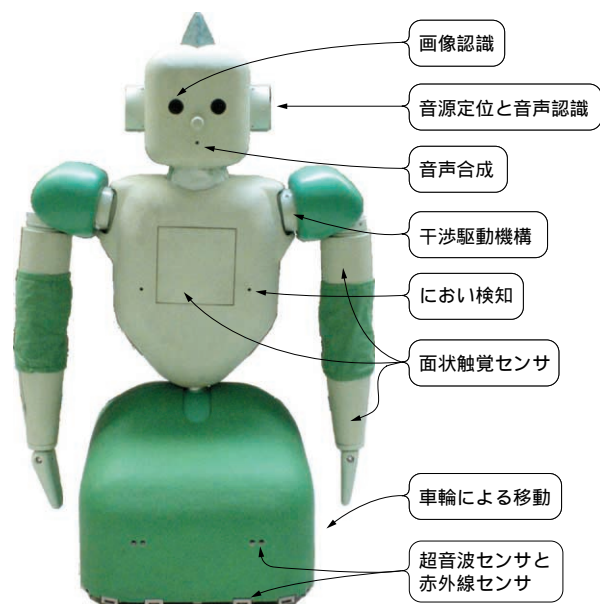



写真1　RI-MANの外観と使われているセンサ機能

KeyWord
全身マニピュレーション，自律的な介護動作，適応運動性能，感覚・運動マッピング，身まね学習方式，実時間冗長自由度系，没入型3次元動力学シミュレーション，バーチャル・リアリティ

軟に触れ合いながら私たちの日常生活や介護作業を支援するロボット」の研究開発が，最優先で取り組むべき技術課題の一つであると考えられます．

本特集は，柔軟性をキーワードにして作られた，人間と触れ合うロボットの研究開発の最前線について触れた後，そのための重要な要素技術を解説します．第1章では，まず，総論としてRI-MAN全体の研究開発を眺めて，RI-MANの構成と機能および開発環境について説明します．そして，具体的な介護作業に応用するための作業分析と開発課題について考察します．以後の各章では，人間と触れ合うロボットにとって最も重要と考えられる要素技術として，第2章では柔軟な駆動制御システムの構造，第3章では柔軟な人工皮膚の開発，そして第4章では柔軟な人工筋肉の開発について解説します．

1. RI-MANはいろいろな意味での「柔らかさ」が求められていた

RI-MANの研究開発の第一歩は2003年にさかのぼります．当初の開発理念として，

1) 機能の柔らかさ，つまり，人との柔軟な力のやり取りや，日常の生活環境に見られる複雑な変化に対する柔軟な適応を可能にすること
2) 機構の人間らしさ，つまり，人間に近い身体の形状，大きさと重さを実現すること

を設計目標に挙げていました．

ここで言う「機能の柔らかさ」には，以下の三つを含んでいます．

1) ロボットの身体表面が柔らかいこと
2) ロボットの身体動作が柔らかいこと
3) ロボットによる状況判断が柔らかいこと

この三つは一見，無関係のように見えますが，1台のロボットの上で実現しようとすると，実は結構絡み合っていることが分かります．

例えば，柔軟な全身接触動作ができるようにするためには，面状の触覚センサによる力のフィードバック制御が必要ですが，ロボットの表面も柔らかいことを要求すると，面状触覚センサの感度が低下してしまう恐れが出てきます．また，「機能」と「機構」の間にも互いに制約があります．一方的に機能の高性能化を追求すると，「機構」も膨大になってしまい，結果として人間の生活空間に入れなくなります．これら設計上の制約のトレードオフを熟慮して，かつ要素技術の開発に工夫を重ねることによって，RI-MANは3年の年月を経てやっと誕生したわけです．

2. 「柔らかさ」を求めたRI-MANの仕様

● 介護ロボットの外観

写真1にRI-MANの外観を示します．高さが158㎝，重さが約100kg，全身が厚さ約5㎜の柔軟なシリコーン素材で覆われています．また，運動機構として頭部には3自由度，両腕部には各6自由度，腰部には2自由度，足となる台車部には2自由度を備えています(**図1**)．さらに，全身5カ所に柔軟な面状触覚センサを備えると共に，視覚，聴覚，きゅう覚のセンサも配置されています．

● 人に触れる

RI-MANは触覚を利用して人間と同サイズの人形を抱き上げることができます(**写真2**)．

触覚は，柔軟な面状触覚センサで，ピエゾ抵抗型の圧力センサを18mmピッチで8×8個並べて実現しました．人間の皮膚構造からヒントを得て硬軟2種類の弾性体を組み合わせた構造を取ることにより，表面の柔らかさと触覚センサの感度向上を両立させることができました．測定レンジは0～90kPa程度です．触覚センサの構成と処理に関するより詳しい解説は，第3章で取り上げます．

● 持ち上げる

小型で大きな力を出す機能を実現するために，生物の多数の筋肉活動間の協調からヒントを得た干渉駆動機構と，ロボットの体全身をもって人間などの被操作対象と接触しながら動作する全身マニピュレーション方式を考案しました．これにより，重さ約35kgの物体を抱えることを可能にしています．逆に，万一処理系に異常が起こった場合には，モータ間の協調関係がくずれ，大きな力を出さずに済むので，安全性にも寄与します．

モータの駆動制御については，第2章を参照してください．

● 命令の伝達

RI-MANには多数のセンサに加えて，多くの自由度を駆動するために19個のモータを使っています．これら多数のセンサとモータを統合するための制御処理系も，人間の神

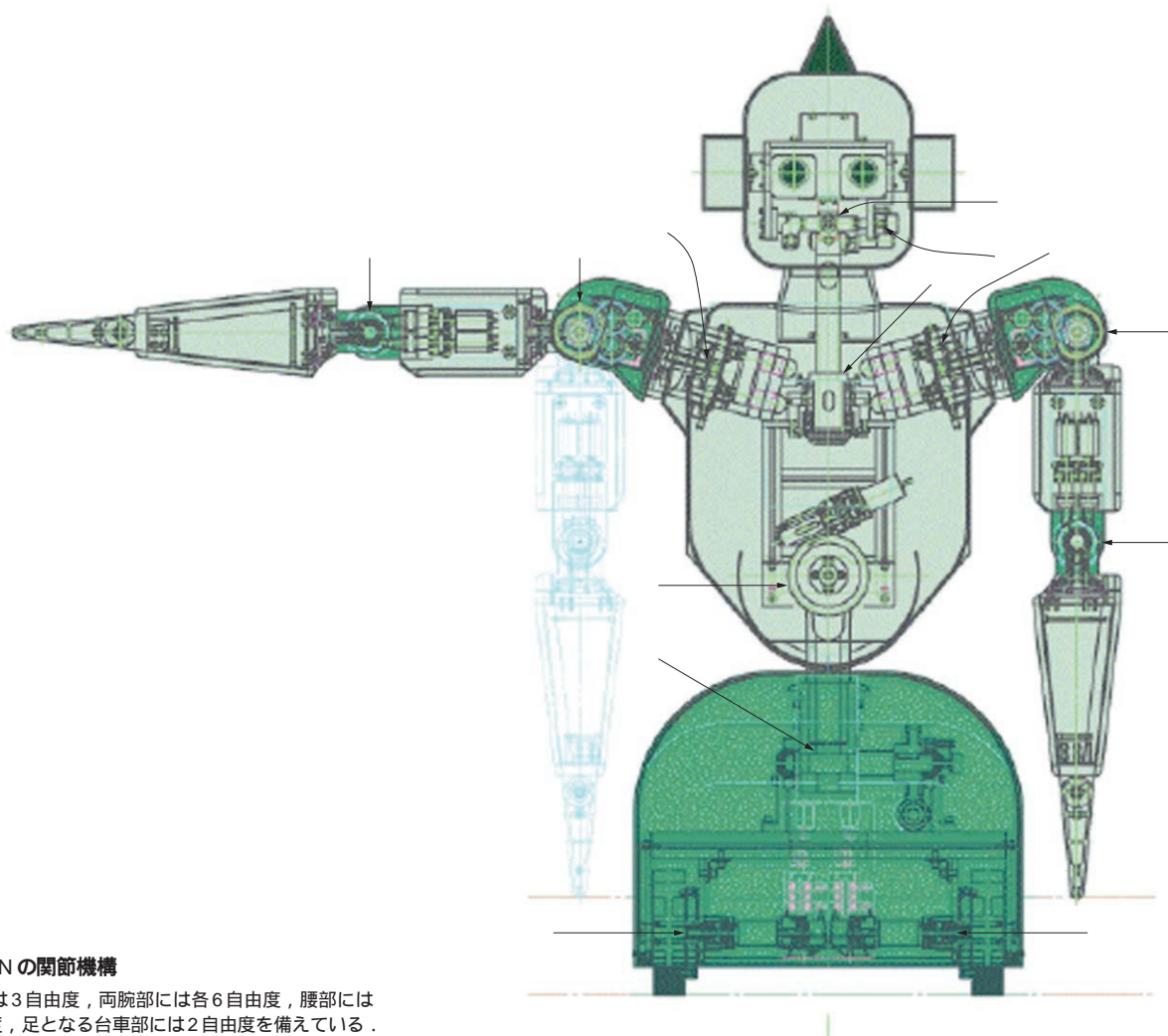



図1
RI-MANの関節機構
頭部には3自由度，両腕部には各6自由度，腰部には2自由度，足となる台車部には2自由度を備えている．

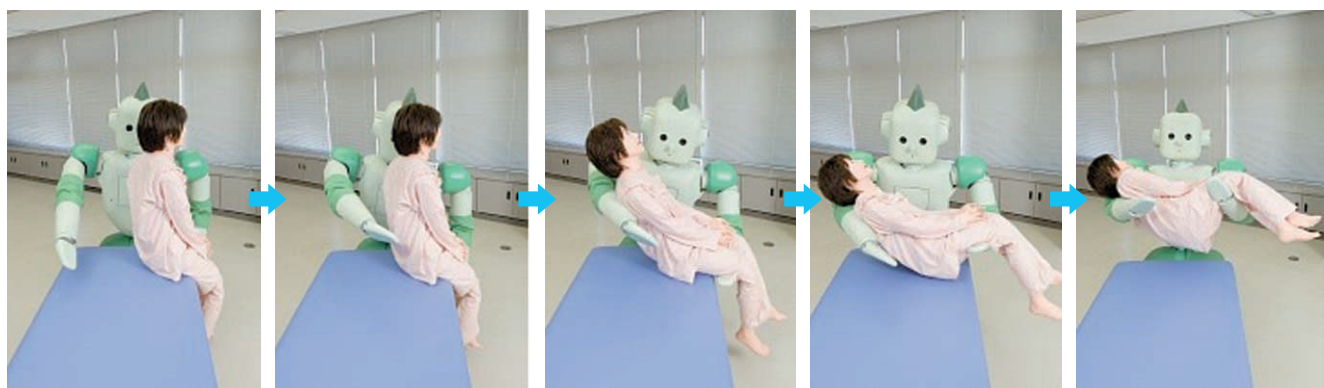



写真2　RI-MANによる被介護者としての人形の抱き上げ

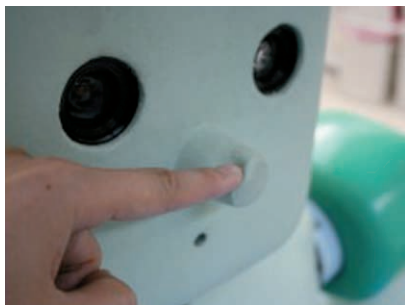
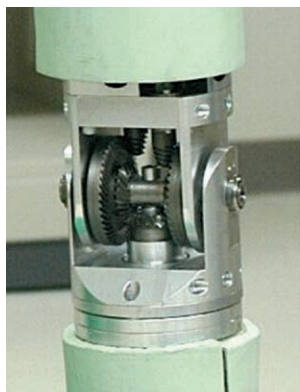
経系を参考にした階層型分散処理構造を採用しています．

具体的には，大脳に対応する「認知用パソコン」(OSはWindows 2000)，小脳に対応する「運動用パソコン」(OSはRT-Linux)，せき髄に対応する小型汎用分散制御装置C-CHIP(第2章で解説)のネットワークによって，全体の統合を図っています．

C-CHIPによって負荷の分散，省配線，センサ近傍で処理を行うことによるアナログ信号へのノイズ混入の低減効

(a) 鼻

(b) 胸部

写真3
ロボットとしての安全性を重視し柔らかな外装を持つRI-MAN

(a) ひじ関節

(b) 腰関節

写真4
ひじ関節と腰関節における巻き込み防止機構

果が得られ，環境に対して素早く，かつ柔軟に対応しながら作業することが可能になりました．

● 声やにおいも識別できる

上記のような要素技術を統合することにより，RI-MANは触覚を利用して人間と同じサイズの人形（重さ18kg）を抱き上げることに成功しました．

音源定位能力と視覚を統合的に用いることにより，呼びかけた人間を探し出すと共に，音声による指令を理解し，被介護者を想定した人形を抱き上げることができます．また，きゅう覚センサによってにおいの識別ができるため，抱き上げた人の衛生状態をチェックすることもできます．具体的な介護作業においては，尿などのにおいの検出が可能です．

● とにかく安全性に配慮した

さらに，人間と接するロボットとしての安全性を重視し，柔らかな外装（**写真3**）や関節における巻き込み防止機構（**写真4**），電気制御系の安全回路はもちろんのこと，最新の没入型動力学シミュレーション技術を利用して考案した，触覚による安全な抱き上げ動作の生成方式も取り入れるなどして，各レベルでの安全対策を施しました（**写真5**）．

（**a**）顔の動きをトラッキングする動作

実験

シミュレーション

（**b**）人間の作用力に対する反応動作

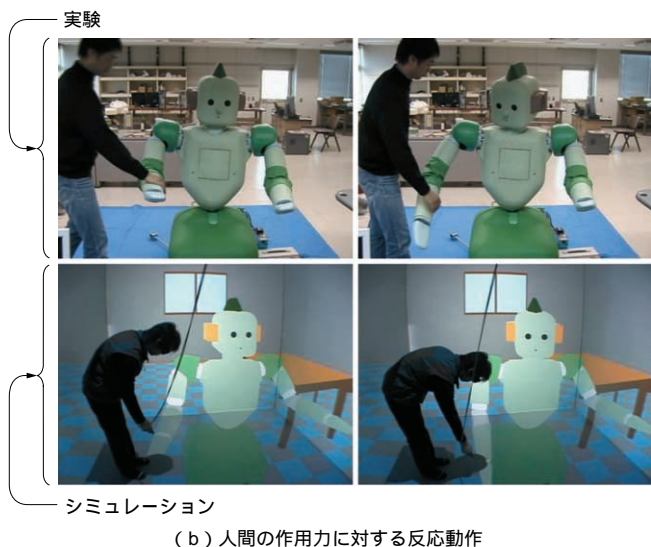



写真5　没入型動力学シミュレーションによるRI-MANの動作評価
それぞれの下段は没入型動力学シミュレーション環境におけるバーチャルなRI-MANの動作．

● 5年後には人間を持ち上げたい

現在はまだ実験段階のため，抱き上げる人形の重さは18kg程度ですが，今後，より重い対象の抱き上げに挑戦したいと考えています．また，安全性と親和性を考えながら，5年後には実際に人間を抱き上げることを目指しています．

● 今後の開発課題

現状では，視覚や音声認識機能がまだまだ初歩的なものであり，照明の状況や部屋の音の反射条件に対して，ロバストでかつ高速に認識処理を行うことができません．

要素技術としては超高速カメラ技術もありますが，自律ロボットにコンパクトな装備ができるほど小型化されていません．つまり，現状としてハードウェアの側面で見ればRI-MANはかなり自律のレベルに達していますが，自らの環境認識に基づく適切な介護動作を生成することが実現できていないことから，ソフトウェアの自律性がこれからの中心課題となっています．

3．人と接触するロボットの適応動作を創造するには

規格化されている工場とは違って，日常生活環境で人間と相互作用をし，柔軟に活動できるロボットにとっては，環境適応機能を自律的に創造することが必要不可欠ではないかと考えます．

● 今までのロボットは基本動作の組み合わせ

近年のエンタテイメント用ロボットは，一見，人間の刺激に対して複雑に動作しているように感じます．しかし実際は，事前にいくつかの基本動作パターンを計算機に記憶させておいて，外界センサ入力に対応して基本動作パターンを組み合わせることで，外界に対する感覚反射で動作を生成しているように見せています．

● すべての条件に対応できるプログラムは作れない

しかし，特に介護動作に見られるような環境や，操作対象である人間との力学的な相互作用を伴う高度なタスクでは，対象物における時々刻々の変動に応じて，実際のロボットの動作を柔軟に調節する必要があります．従って，最適な運動計画と実時間における反射を，よりいっそう有機的に組み合わせることが必要となります．

今までのロボットの動作は，主に設計開発者によるきめ細かなプログラムに依存していました．しかし，未知で複雑に変化する生活環境においては，すべての環境条件に対応できる動作プログラムを事前に作成することは，もはや不可能となります．

RI-MANによる自律的な介護動作を創造するためには，まず被介護者の日々の健康状態の変化や，それぞれの身体特性，そして，寝ている状態，座っている状態，立っている状態など，ロボットによる介護動作を実施する前に被介護者の身体状態を把握する必要があります．

また，多くの場合，RI-MANによる単独介護ではなく，むしろほかの介護者の助けを直接または間接的に受けながら，互いに協調しあって介護動作を実施するのが現実的と考えられます．このとき，RI-MANによるほかの介護者や被介護者との円滑な意思疎通や動作調和が重要となります．

実際，人を抱き上げるという作業例だけでも，まず何よりも被介護者にけがをさせないことが大切です．そのためには，ロボットと被介護者との接触力の分散を図る必要があります．また，被介護者を移乗させるための重心操作および被介護者の関節変化による滑り落ちを防止するなど，複雑な全身力制御が必要です．

こうした観点から，より定量的にRI-MANの適応運動性能の評価を行い，ロボットの動作改善につなげることが大切です．

● 命がかかっている，失敗は許されない

特に強調したい点は，産業機器向けロボットの作業とは違って，介護作業は人の命と直接かかわるので失敗は絶対に許されないことです．ロボットにとってこうしたタスクを自ら学習して熟練するためには「安心，安全，親切」などを重視して，今まで有用視されてきた未知環境におけるロボット学習の枠組み（強化学習など）や評価尺度，設計方式を含めて抜本的に考え直す必要があります．

4．環境適応動作を創造する機能の実現に向けて

具体的な「柔らかさを持つロボット」の環境適応動作創造機能を実現するためには，以下に示すいくつかの数理的研究課題があります．

1）動作基準

従来の産業機器向けロボットでは，動作の速さやエネルギー効率を評価項目として動作を生成していました．ところが，人間と共存する環境で動作するためには，周囲の人間から見て自然となるロボットの動作が必要で，そのための評価基準を明らかにする必要があります．

2）感覚・運動マッピング

視覚や触覚といった感覚情報は時空間的に変化するのに対して，それに対応する身体運動制御信号は多次元の時間信号です．従って，各感覚間および感覚から運動に至るまでの情報統合の基本的な枠組みと基礎数理を確立する必要があります．

3）最適性と適応性の統一

動的環境内における身体運動の実時間動作計画，学習と適応の統一的な枠組みを考案する必要があります．

4）連続と離散

高度な動作を可能にするためには，

- 多指ハンドの制御
- 全身マニピュレーション
- 歩行動作

に見られるようなロボットと対象物体または環境との多点間接触，多数の摩擦モード間の遷移を伴う離散・連続混合運動を定式化しなければなりません．

● 理化学研究所の取り組み

これらの課題について，部分的ではあるものの，筆者の所属している研究センターをはじめ，いくつかの試みが始まっています．

1）に関して，今までの先行研究として，自由運動空間と環境拘束空間における人間上肢の運動規範が研究されています．また，最近では動的な対象物体を操作するときの人間上肢の運動規範を，実験と数理解析の両面から検証していると報告されています．ただし，全身運動の運動規範については研究がまだほとんど見当たりません．

2）については，「身まね学習方式」を提案しています．ここでは，視覚や触覚などの感覚フィードバックに基づく人間の運動機能をロボットに実現させようと，没入型動力学シミュレーション技術を活用して，接触作業における人間の動作モデルを，運動情報とそのときの外界感覚情報とあわせてモデル化し，このモデルを用いてロボットの動作生成を行うようにしています．

ロボットは実際，動作中に得られた外界感覚を動作モデルに記録している感覚情報と比較して，動作調節を行っています．これによって，外界環境がモデル化されにくい場合でも，ロボットの確実かつ巧みに作業を成功させる確率が上がったと，実験およびシミュレーションで確認されています．

作業環境と力学的な接触作業におけるロボットのインピーダンス制御が以前から提案されていますが，等価的に位置のフィードバック制御と力のフィードバック制御を合わせたもので，実際の接触力と動作モデルにある力情報を対比するような構造になっていません．

3) の実時間冗長自由度系の運動計画，学習，適応の統一的な枠組みに関する研究について，体の受動性，骨格筋の非線形特性に着目して，近年精力的に理論開発を進め，工学的に大変興味深い結果が得られています．しかし，最適化と適応を統一させる理論がまだ得られてないので，まだまだ発展途中であると言えるでしょう．

4) の研究については，現状としていくつかの制御理論で開発されていたモデル（例えばMLD： Mixed Logical Dynamical System）をロボットの歩行や走行，多指ハンドによる物体操作に適用しています．しかし，混合整数最適化問題に帰着され，その問題の複雑さや計算量などの問題からまだ決定的な実用方法は見つかっていないのが現状です．

このように，人間と柔軟に触れ合えるロボットの環境適応機能創造については，その概念自身もまだ明確に定義されていません．しかし，その周辺の関連研究は既に着実に進展し，多くの試みがなされています．いずれも数理的に難問ばかりなので，それらを解決するために，今後，より

コラム　没入型3次元動力学シミュレーション

工場などで使われている産業機器向けロボットには，運動の高速化，高精度化，高効率化が要求されますが，人間と触れ合って生活支援を行うロボットにとっては対人親和性と安全性が最も重要となります．

また，人間がロボットの形や色，動きを主観的にどう評価するかも大切です．実験段階でまだ完成されていないロボットを用いて人間と力学的な触れ合い動作をテストすることは，大変危険で，かつ実験コストが膨大になります．そこで，従来の機械システムの設計と実験，評価などと根本的に違った開発環境が必要と考えられます．

最新のバーチャル・リアリティ技術を活用すると，2種類の没入型3次元動力学シミュレーションが可能となっています．第1の没入型技術では，人間があたかもロボットの体内に入り込んだ感覚で，ロボットと同じ周囲環境と接することができます．また，第2の没入型技術では，人間があたかもロボットと同じ作業環境を共有して，同じ身長のロボットを目前に互いに触れ合うことができます．以下，主に2番目の没入型技術について紹介します．

没入型技術では，まず立体視スクリーンの中に立つ人間の動きを計測して，実時間動力学演算を行う計算機に入力します．この入力に応じて動力学演算用計算機は，3次元の重力場で活動するロボットの身体運動および物体間の衝突を計算し，計算結果を描画用計算機に送信します．描画用計算機では，こうした計算結果を基にロボットおよびその周辺環境の画像を生成して立体視スクリーンに投射し，同時に物体間の衝突音をその衝突場所に提示します．これによって，スクリーンの中に立つ人間に高い臨場感を与えることができます．この技術を用いて，仮想的にロボットから人形を抱き上げているシミュレーション実験を**図A**に示します．また，**図B**では赤いロボットに対して人間がいろいろな部分や方位からロボットに力を加えて，そのときのロボットの動きや転倒のようすを直感で確認検証しているシミュレーションです．

RI-MANの開発およびその人間の抱き上げ動作生成にも，ここで紹介した没入型3次元動力学シミュレーション技術を活用しました．この技術によって，より効率的，低コスト，安全かつ高臨場感で人間と触れ合うロボットの設計と検証，評価を可能にしました．

図A　ロボットから人形を抱き上げているシミュレーション

図B　ロボットの動きや転倒のようすを直感で確認検証しているシミュレーション
赤いロボットに対して人間がいろいろな部分や方位から力を加えている．

多くの研究者による，さらなる努力が必要でしょう．

● 柔らかさを追求すると新しいアクチュエータが必要

柔らかさを持つロボットの実現に向けて，以上に述べた数理的な難問に加え，ハードウェアの側面からも核心技術として，柔らかさを持つロボットのためのアクチュエータを一から開発し直す必要があります．

今までのロボットは，基本的に電気モータを利用するのが主流でした．その結果，ロボットの高速化と高精度化に寄与したことは否定できませんが，高出力を実現するのに高いギア比のトルク伝達機構を取り入れたため，外力に対して高い剛性を示し，力センサによるフィードバックなしでは柔軟な接触動作が実現できませんでした．

人間と触れ合う柔らかさを持つロボットにとって，生物の筋肉のような，作業に応じて柔らかさが調節でき，運動の精度を保つための剛性と外部接触に対する柔軟性を両立できる駆動技術の開発が急務でしょう．

柔軟なアクチュエータの開発について，近年，いくつかのタイプの人工筋肉の研究開発が進んでいます．第4章にその開発の最前線を紹介します．

5. 今後の展開

少子高齢化を背景に，RI-MANが新聞発表され，その実用性が大いに期待されています．しかし，これまでの解説からも分かるように，ロボットの環境適応動作創造に関する研究は，ロボットのタスクのモデル化から数理解析，工学設計まで，数多くの研究課題が残されています．

人間が日常暮らしている空間は，整然とした工場と違って日々変化するので，ロボットは多くの情報を得て柔軟に対処する能力が必要となります．今後，さらなる研究の連携を促進することによって，多数のセンサ入力で環境変化に対してより柔軟な対応が行えるようにRI-MANの自律性を高めることが最も重要な課題でしょう．これにより，人と接して力仕事を柔軟に行う「体力」と，家庭などの複雑な環境で柔軟に行動する「理知」を持つロボットの実現を期待し，より実用に近いレベルで介護やリハビリテーション，また引っ越しなどの力仕事の補助を行い，科学技術の「力」でわれわれの暮らしをより豊かにすることを夢見ています．

こうした基礎的な研究を地道に積み上げることで，やがて，情報とは何か，時空間的なセンサ情報をいかに各自由度の動作制御に利用されるのか，知覚と運動機能を備える知能システムの持つべき最も原理的なプログラムの最小サイズと構成はどうなるのか，などの本質的な疑問に直面することとなり，最終的には情報科学やセンサ工学，システム制御工学の新しい革命を促すことになるに違いありません．従って，実社会で柔らかさを持つロボットによる人間との柔軟な触れ合い，環境適応機能創造の研究開発は，同時にシステム情報科学の変革を求める挑戦でもあります．

参考・引用*文献

(1) 羅 志偉，平野慎也；分散制御システム開発の事例研究，Design Wave Magazine，2006年4月号，pp.95-114.
(2) 大西正輝，小田島正，羅 志偉，細江繁幸；人間と接するロボット開発のための没入型3次元動力学シミュレーション環境，電子情報通信学会論文誌，Vol.J88-D-II，No.2，pp.368-377，2005.
(3) F.Asano,Z.W.Luo,M.Yamakita,S.Hosoe； Modeling and bio-mimetic control for whole-arm dynamic cooperative manipulation，Advanced Robotics，Vol.19，No.9，pp.929-950，2005.
(4) 大西正輝，小田島正，羅 志偉；環境と接するロボットの感覚運動統合による動作模倣，電気学会論文誌C，Vol.125，No.6，pp.856-862，2005.
(5) 理化学研究所；RI-MANの紹介
http://www.bmc.riken.jp/~RI-MAN/index_jp.html

Zhi-Wei Luo
神戸大学大学院工学研究科
独立行政法人 理化学研究所
バイオ・ミメティックコントロール研究センター

<筆者プロフィール>
羅 志偉．神戸大学大学院工学研究科教授，兼，独立行政法人理化学研究所 バイオ・ミメティックコントロール研究センター 環境適応ロボットシステム研究チーム，チームリーダー．博士(工学)．専門はロボット工学，システム制御工学．複雑な環境変化に適応しながら人間と柔軟に触れ合う次世代知能ロボットの開発および介護支援作業への応用に関する研究教育活動に従事している．本特集関係記事の執筆にあたり，RI-MAN開発に携わっている理化学研究所の研究員の皆様に感謝申し上げます．

1